

深発地震のメカニズム：スラブの変形と
物理過程の数値シミュレーション

(研究課題番号 16540388)

平成 16 年～平成 18 年度科学研究費補助金（基盤研究(C)）
研究成果報告書

平成 19 年 3 月

研究代表者 中久喜伴益

(広島大学大学院理学研究科助手)

はしがき

1. 研究課題

深発地震のメカニズム：スラブの変形と物理過程の数値シミュレーション
課題番号 16540388

2. 標題

平成16年～平成18年度科学研究費補助金（基盤研究(C)）研究成果報告書
平成18年3月作成・提出

3. 研究組織

研究代表者 中久喜 伴益 広島大学大学院理学研究科助手

4. 交付決定額（配分額）

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成16年度	1,200,000	0	1,200,000
平成17年度	1,100,000	0	1,100,000
平成18年度	1,000,000	0	1,000,000
総計	3,300,000	0	3,300,000

5. 研究発表

（1）学会誌・雑誌等の論文発表

Tagawa, M., T. Nakakuki, and F. Tajima, Dynamical modeling of trench retreat driven by the slab interaction with the mantle transition zone, *Earth Planets Space*, **59**, 65-74, 2007.

Tagawa, M., T. Nakakuki, M. Kameyama, and F. Tajima, The role of history-dependent rheology in plate boundary lubrication for generating one-sided subduction, *Pure Appl. Geophys.*, **164**, DOI 10.1007/s00024-007-0197-4, 2007 (印刷中).

田島文子・中久喜伴益・吉岡祥一，スタグナントスラブに伴うマントル構造の地震学的解析と数値シミュレーション（総合報告），地震，第2輯，**58**，121-151，2005.

(2) 国際会議, 学会, 研究会などでの口頭発表

多川道雄・中久喜伴益・田島文子・吉岡祥一, スラブとマントル遷移層との相互作用 : リソスフェアの強度の影響, 日本地震学会2004年秋季大会, 福岡, 2004年10月9日-11日.

多川道雄・中久喜伴益・田島文子, リソスフェアの引張り強度が沈み込みに及ぼす影響, 地球惑星科学関連学会2004年合同大会, 千葉, 2004年5月9日-13.

Tagawa, M., T. Nakakuki, and F. Tajima, Numerical simulation for spontaneous generation of one-sided subduction with hysteresis-dependent rheology, AGU 2004 Fall Meeting, San Francisco, CA, Dec. 13-17, (*EOS Trans. American Geophysical Union*, **85**, 2004).

Nakakuki, T., C. Hamada, M. Tagawa, and F. Tajima, Effects of lithospheric strength on the generation, longevity, and structure of the subduction, AGU 2004 Fall Meeting, San Francisco, CA, Dec. 13-17, (*EOS Trans. American Geophysical Union*, **85**, 2004).

多川道雄・中久喜伴益・田島文子・吉岡祥一, Numerical Simulation of Trench Retreat and Slab Stagnation Related to Lithospheric Tensional Strength, 地球惑星科学関連学会2005年合同大会, 千葉, 2005年5月22日-26日.

多川道雄・中久喜伴益・田島文子, スタグナントスラブの数値シミュレーション, 日本地震学会2005年秋季大会, 札幌, 2005年10月19日-21日.

多川道雄・中久喜伴益・田島文子, Numerical simulations of slab stagnation with trench retreat, 日本地球惑星科学連合2006年大会, 千葉, 2006年5月14-18日.

中久喜伴益・多川道雄・橋本達樹, Dynamics of the subducted lithosphere with asymmetric structure inferred from 2-D numerical models of the plate-mantle system, 日本地球惑星科学連合2006年大会, 千葉, 2006年5月14-18日.

橋本達樹・多川道雄・中久喜伴益, Effects of T- and p-dependent thermal expansivity on the layering of mantle convection and the fate of subducted slabs, 日本地球惑星科学連合2006年大会, 千葉, 2006年5月14-18日.

中久喜伴益・多川道雄・亀山真典, プレート・マントル対流結合系の数値シミュレーション : 沈み込みの開始からスタグナントスラブの形成まで, 日本地球惑星科学連合2007年大会, 千葉, 2007年5月19-24日.

多川道雄・中久喜伴益・岩瀬康行, スタグナントスラブ形成と崩落に関するレオロジーの役割, 日本地球惑星科学連合2007年大会, 千葉, 2007年5月19-24日.

目次

1. 研究の概要

- 1.1 研究の目的
- 1.2 研究の経過

2. 研究の内容および成果

- 2.1 高分解能マントル対流コード
- 2.2 スラブの変形メカニズムと応力場

3. 付図

- 3.1 図説
- 3.2 付図

4. 添付論文

Tagawa, M., T. Nakakuki, and F. Tajima, Dynamical modeling of trench retreat driven by the slab interaction with the mantle transition zone, *Earth Planets Space*, **59**, 65-74, 2007a.

Tagawa, M., T. Nakakuki, M. Kameyama, and F. Tajima, The role of history-dependent rheology in plate boundary lubrication for generating one-sided subduction, *Pure Appl. Geophys.*, **164**, DOI 10.1007/s00024-007-0197-4, 2007b (印刷中).

Nakakuki, T., C. Hamada and M. Tagawa, Effects of the asymmetric subduction structure on the generation of plate-like motion in the dynamical model of integrated plate-mantle system, *Phys. Earth Planet. Intr.* (改訂中).

1. 研究の概要

1.1 研究の目的

本研究では、地球物理学における未解決問題である深発地震のメカニズムを解明する突破口を開くため、スラブ内物質のマクロおよびミクロな変形過程について数値シミュレーションを用いて明らかにする。その内容は2つで、スラブ物質内部で起きる相転移や粘性発熱などの物理過程を考慮してスラブ全体の大規模な変形を計算し、深発地震の背景となる応力・歪みの場を求めること、さらに、その応力場の元で内部の鉱物構造の変化や相転移による圧力の低下などの物理過程を数値計算により明らかにすることである。さらにミクロからマクロの変形過程へのフィードバックにより、急速で大規模な変形過程が存在しうるか調査する。

1.2 研究の経過

平成16年度は、高分解能のスラブモデルを作成するため、安定に効率良く計算が行えるマントル対流プログラムの開発を行った。このプログラムを用いて、沈み込む開始のシミュレーションを行い、沈み込み口でのスラブの変形についての研究を行った。これによって、沈み込みの計算で用いるレオロジーパラメータの有効性を、プレートの応力分布や歪み速度などを再現出来るか調べることによって確認した。また、リソスフェアの引っ張り強度を考慮して、マントル遷移層との相互作用に関する数値シミュレーションを行った。高速計算サーバーを導入しプログラムの開発および計算に使用した。

平成17年度は、引き続き沈み込むスラブの変形・応力場に関する研究を行った。前年度開発したプログラムおよび沈み込みのモデルを用いて、沈み込みおよび沈み込むスラブとマントル遷移層との相互作用に関する数値シミュレーションを行った。計算には昨年度導入した高速計算サーバーおよび広島大学の情報メディアセンターのHPCサーバーを利用した。本年度は、(1) 昨年開発したモデルに関して、数値計算精度および簡略化したパラメータの実効性についての検証。(2) 410km相転移に伴う結晶細粒化の影響。(3) 熱膨張率の温度圧力依存性のスラブの形状への影響、という3つについて研究した。本年度は動画およびプレゼンテーションを作成するため、2台のパソコンを導入した。

平成18年度は昨年度までに開発した自発的沈み込みモデルを用いて、スラブの応力場とそれを決定するメカニズムについて研究した。我々の沈み込みモデルでは、これまでのスラブモデルと比較してアーレニウス型の温度依存性を用いるなど、現実に近いレオロジーを用いていることが特徴である。本年度は、(1) マントル粘性率の層構造の影響 (2) 660km相転移に伴う結晶細粒化の影響、について研究した。計算は大規模なものになったので、主として広島大学の情報メディアセンターのHPCサーバーを利用した。本年度は結果を可視化するための高速ワークステーションを導入した。可視化ソフトウェアは既存の物を用いた。なお、ミクロな変形メカニズムについてのシミュレーションは計画通り実行することが出来なかった。これは、今後研究を実行したいと考えている。

2. 研究の内容および成果

2.1 高分解能マントル対流シミュレーションコードの開発

マントル対流は数千キロメートルの大きなスケールの現象である。しかし、プレートに注目してみると、そこではプレート境界の様に非常に小さな範囲で変形が起こり、これがプレート全体の運動に影響を与えている。従って、プレートがマントル対流系の一部として含まれる形でマントル対流を再現するためには、このような小さなスケールの分解能でマントル対流を解かなければならない。このような問題を現実的な時間で計算するのは、2次元の計算でも困難である。本研究ではスラブをマントル対流系の一部として扱う。このため、局所的に分解能を上げるアルゴリズムを考案し、これを取り入れた2次元計算コードの開発を行った。

コードのアルゴリズムは次のような考え方を元に行っている。マントル対流は粘性が大きいいため、プラントル数無限大の流体である。このため、運動方程式は定常状態の形になる。このため、運動方程式には多大な計算時間が必要である。しかし、運動方程式を解く際にはプレート境界のように短い距離で粘性が急激に変化する場所を除き、高い分解能は必要でない。一方、小さい拡散係数を持つエネルギー方程式や物質輸送方程式には高い分解能が必要であるが、計算時間は短い。このことを利用して、2つのメッシュ層を利用し、分解能の向上と計算時間の短縮を図った。すなわち、輸送方程式の計算には一様メッシュ(プライマリ・メッシュ)を用い、計算時間の掛かる運動方程式は局所的に分解能を向上させた非一様メッシュ(セカンダリ・メッシュ)を使用する(図1上)。このとき、セカンダリメッシュでは、一番細かいメッシュをプライマリメッシュと同じ大きさにとる。さらに、他のメッシュはこの整数倍の大きさとする。2つのメッシュの間では次のように変数を受け渡す(図1下)。プライマリからセカンダリについては、密度を積分して渡す。逆に、セカンダリからプライマリでは流線関数を内挿して渡す。流線関数を用いるので、補間の方法によらず質量保存を満たしている。マントル対流のプラントル数無限大という性質は計算の困難も引き起こすが、プレート境界が移動する様な場合に利用することが出来る。つまり、運動方程式は毎タイムステップで定常状態を求めるので、毎回メッシュ構造を変えても毎回その速度場が決まる。つまり、メッシュが動いても時間方向に流線や速度を補間してメッシュに合わせる必要がない。このことから、本研究で開発した方法は、流れに応じてメッシュ構造を変えるアダプティブメッシュ法に容易に拡張できる。計算式や計算の精度など詳細についてはTagawa et al. (2007b) にまとめた。

2.2 自発的沈み込みモデルの開発

開発したコードを用いて、これまで開発してきた自発的沈み込みモデルによる沈み込みの計算を行った。ここでは、プレート境界は水に富む海洋地殻の強度が低下することによって作り出されると考えた。これにより、マントル対流系の一部としてのプレートを1~2 km程度の分解能で再現出来るようになった。これまでのスラブモデルと比較してアーレニウス型の温度依存性を用いるなど、現実に近いレオロジーを用いていることが特徴である。この計算では、プレート沈み込み過程におけるスラブの歪み速度と応力場に注目し、プレートのレオロジーを決めているパラメータの妥当性について検討を行った。また、数値計算精度および簡略化したパラメータの実効性についても検証した。その結果、(1)プレートの沈み込みを起こすには、プレート境界の摩擦係数が非常に小さくなければならない。(2)沈み込みが起こるか否かについて影響が小さい。(3) brittle layerの摩擦係数はスラブ沈み込み口での応力が中立となる面の深さに影響する。摩擦

係数はByerleeの式の0.6より小さい0.3程度でも観測と矛盾しない。(4) プレートの粘性率の最大値は 10^{25} Pa s程度で打ち切っても計算に影響しない。これは降伏応力により最大の応力が決まるためである。(5) 上盤プレートの自由な運動が起きるモデルを開発し、今まで計算よりも実際の沈み込み帯に近い浅い角度で沈み込むスラブを再現することが可能になった。(6) このとき海溝の後退により、スラブはunbendingを起こすので、スラブの上半分に圧縮応力場が生ずる。ここでの結果はTagawa et al. (2007b) にまとめたので、添付論文を参照して欲しい。

2.3 沈み込むスラブとマントル遷移層との相互作用

浅い伏角を持つ沈み込むスラブを実現できたので、スラブとマントル遷移層の相互作用によって作られるスラブの変形および応力について研究を行った。本研究では相転移が熱平衡のみで決まる場合のみを考えた。スラブの挙動を決定する物理的な設定として次のようなことを考慮した。プレートのレオロジーとして、(1) プレートの引っ張り強度、(2) 相転移に伴う鉱物の細粒化による強度（実効粘性率）の低下を考慮した。同時に、(3) 下部マントルの粘性増加のスラブの形状および応力場への影響。(4) 熱膨張率の温度・圧力依存性のあるスラブの形状への影響についてもモデルに取り入れた。

シミュレーションの結果、スタグナントスラブの形成および崩落に対して、次のような効果があることが分かった。(1) 海溝の後退が起きるときには、スラブの伏角が小さくなることと、スラブを後ろ向きに引っ張るような剪断応力発生するため、横たわるスラブが形成されやすくなる。(2) 下部マントルの粘性率の増加する場合には横たわるスラブが形成されやすくなる。(3) 熱膨張率の温度・圧力依存性を考慮すると、スラブの負の浮力が減少し、かなり緩いクラペイロンスロープでもスタグナントスラブが形成されることがある。(4) 熱膨張率の温度・圧力依存性の効果は粘性ジャンプと組み合わせると、より効果的である。 -1 MPa/K程度のクラペイロンスロープでもスラブが斜めになっている時には十分スタグナントスラブを作り出せる可能性がある。

スラブの応力場を決定するメカニズムについては、次のようなことが重要であることが分かった。得られた典型的な応力場を図2に示す。(1) スラブは有限の厚さを持つ板であるため、スラブの曲がり方が応力場に強く影響する。(2) (1)の結果、相境界の浮力のみでは遷移層スラブに見られるdown-dip compressionのみの応力場を実現することは難しい。(3) このとき、スラブは660km相転移面からの上向きの力、410km相転移面からの下向きの力を受け、遷移層のスラブにトルクを生じるため300から400km付近で大きな破壊が生ずる。これは深発地震の深さ・頻度分布とは合わない。(4) 660km相境界付近のスラブ内部の応力は、スラブがスタグネーションする場合より、スラブペネトレーションが起こる場合の方が大きくなる可能性が高い。これらの難点を克服するには660km境界に粘性のジャンプを取り入れることが必要である。すなわち、(5) 粘性率が660km境界で10倍程度増加する場合には、down-dip compressionのみの応力場を実現することが可能である。これに加えて、(6) 滞留スラブ内の応力も小さくすることが出来る。これは多くの滞留スラブで地震が起きていないことを説明する。ただし、これは、伊豆小笠原やニューヘブリデス沈み込み帯に見られる孤立深発地震を説明できない。ただし、粘性率の増加はプレート運動強い影響を与え、現在のプレート速度を説明するためには、マントル遷移層内での結晶細粒化など、スラブの強度を低下させるメカニズムが必要である。プレート速度を低下させないメカニズムとして、660km境界での相転移に伴う細粒化を考慮してみた。しかし、(7) 660km境界での細粒化は下部マントルにおけるスラブの応力場に強い影響を与えるが、プレート運動の速度にはあまり強い影響を与えず、速度が増加しても2倍程度である。現在のプレート速度を説明するた

めには、マントル遷移層内での結晶細粒化など、スラブの強度を低下させるメカニズムが必要であると考えられるが、深発地震を発生させるような高い応力を発生させるために、別の変形メカニズムを考慮する必要があると思われる。例えば、転移クリープや水によるスラブ強度の局所的低下である。

3. 付図

3.1 図説

図1. 新しく開発した数値計算法で利用するメッシュの構造. 左: 輸送方程式を解くプライマリ・メッシュ、右: 運動方程式を解くセカンダリ・メッシュ.

図2. シミュレーションで得られたスラブの応力場. 左: プレート境界が固定している場合. 中央および右: プレート境界が自由に動ける場合.

3.2 付図

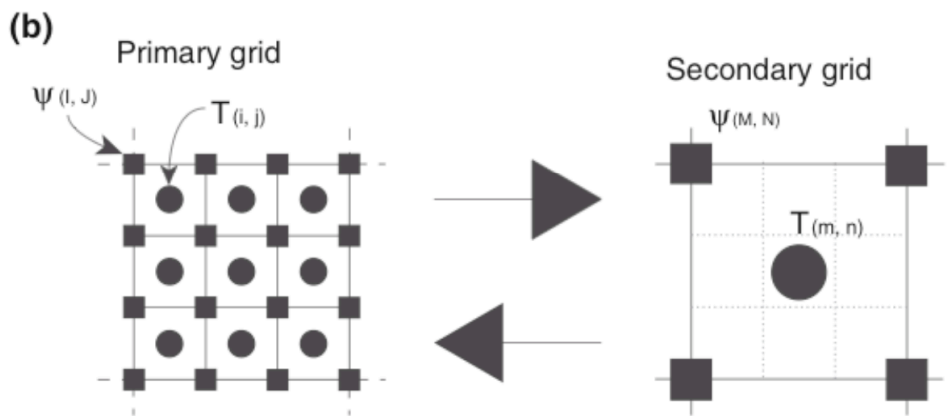
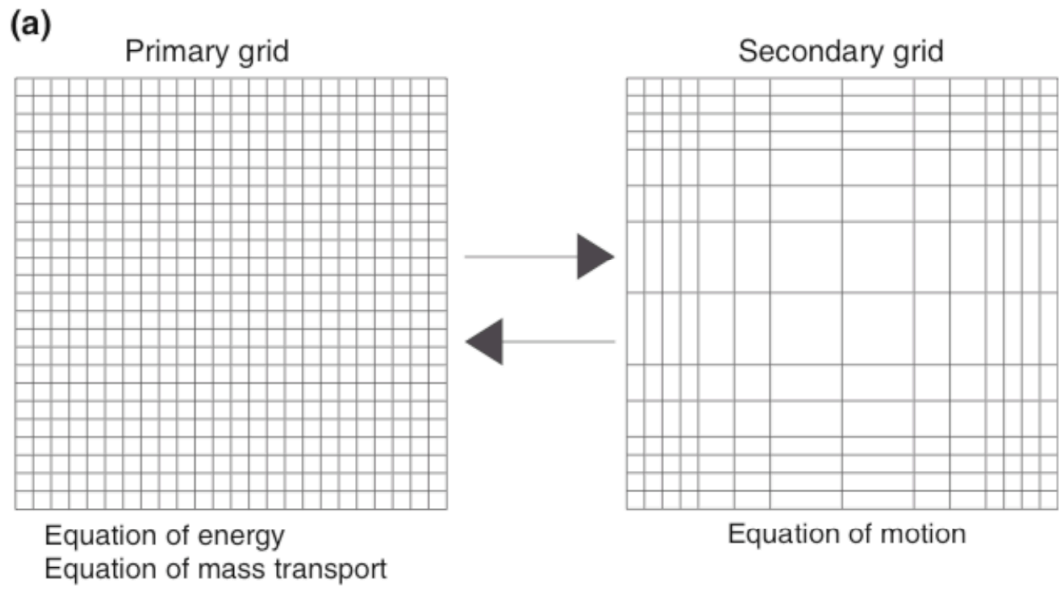


图 1

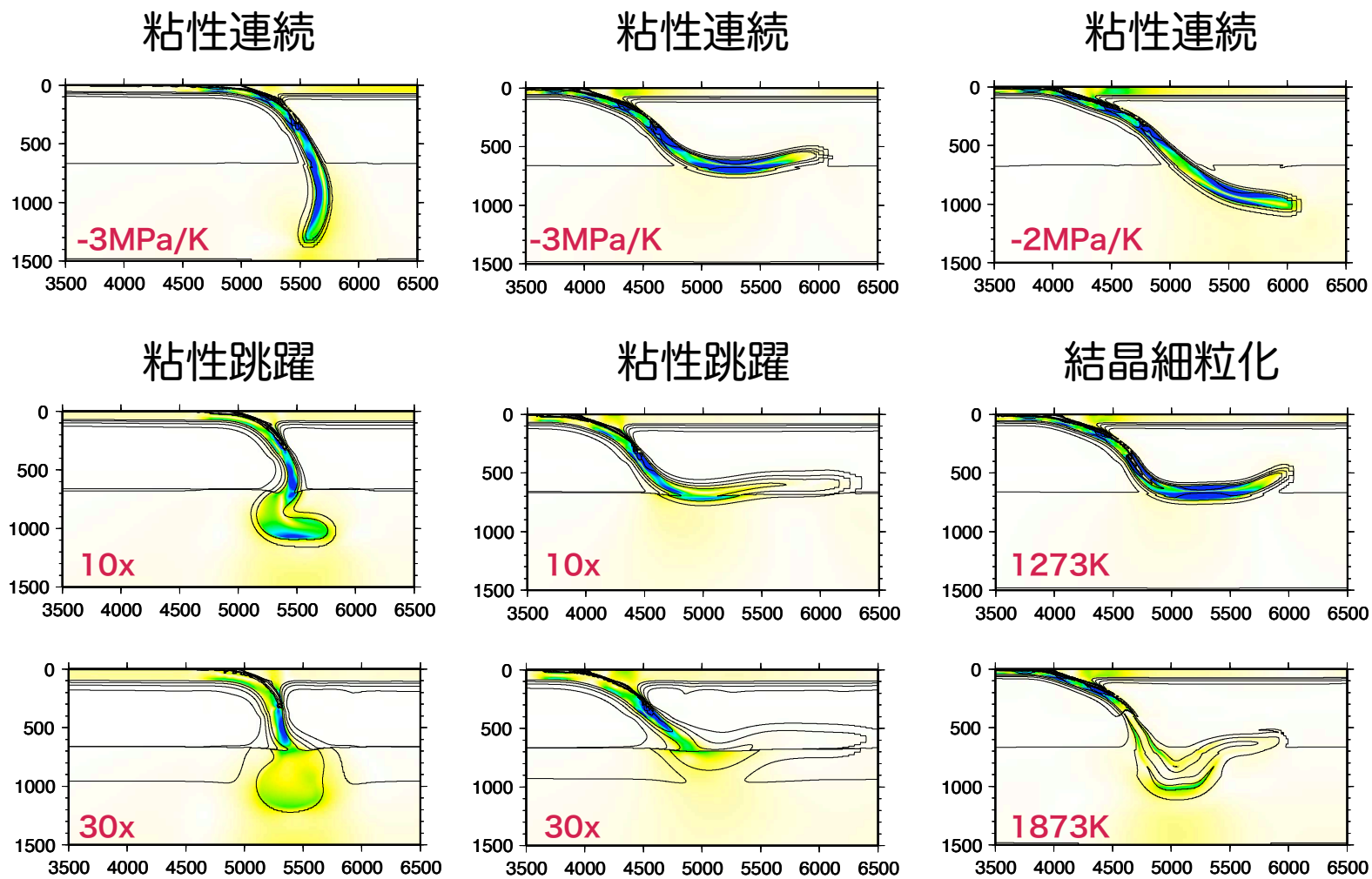


図 2

4. 添付論文